

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

過濃予混合正デカン噴霧流の総当量比が火炎構造に与える影響

Effects of Overall Equivalence Ratio on Flame Structure of Rich-Premixed n-Decane Spray Jet

三上 真人^{1*}・中本 圭太¹・小嶋 直哉¹・森上 修²MIKAMI, Masato^{1*}, NAKAMOTO, Keita¹, KOJIMA, Naoya¹, and MORIUE, Osamu²

1 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1
Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611, Japan

2 九州大学大学院工学研究院 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
Kyushu University, Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

2007年11月30日受付; 2008年1月24日受理/Received 30 November, 2007; Accepted 24 January, 2008

Abstract : The flame structure of rich-premixed-spray jets in quiescent atmosphere was experimentally studied for different overall equivalence ratios of the fuel spray/air mixture. N-decane was used as a low-volatility fuel to elucidate the local heterogeneity effect. The overall equivalence ratio of the premixed-spray jet was varied with the fuel flow rate while the air flow rate in the premixed-spray jet was kept constant. As the overall equivalence ratio was decreased from a quite large value, the combustion mode transitioned from the combustion with the external flame alone to that with the external flame and the internal flame. Further decrease caused disintegration of the internal flame. In this case, the internal flame oscillated largely and a part of the internal flame was sometimes disintegrated into bubble-like internal flames, which disappeared inside the external flame. The oscillation and disintegration of the internal flame was possibly caused by non-uniformity in local flame-spread rate due to non-uniform droplet spatial distribution. Characteristics of the internal flame, including transition from combustion with the internal flame to that without the internal flame, were discussed based on the analogy to the spreading flame in the premixed spray.

Key Words : Spray Combustion, Premixed Spray, Group Combustion, Flame Structure

1. 緒言

噴霧燃焼を安定に行うためには、燃料噴霧の群燃焼が必要である。群燃焼はこれまで多くの研究者により研究がなされてきている[1-4]。実機における噴霧燃焼を考えると、まず噴射された燃料と周囲空気との混合が微粒化の過程で生じ、その後、着火および燃え広がりといった過渡的過程を経て群燃焼が生じる。燃料噴霧と空気の混合物を以下予混合噴霧と呼ぶ。このように予混合噴霧の燃焼は噴霧の群燃焼発現に到る過渡的過程を調べるうえで重要である。一般の気流微粒化式のガスタービンにおいては、過濃予混合噴霧流が燃焼領域に供給される。

予混合噴霧燃焼は主に対向流における噴霧燃焼[5-10]、噴霧流燃焼[3,11-13]および予混合噴霧中の燃え広がり[14-16]を対象に研究がなされている。予混合噴霧の燃焼特

性に大きく影響するものとして予混合噴霧の総当量比がある。総当量比を変化させた場合の一つの極限は総当量比無限大に相当する非予混合噴霧の燃焼である。Chen・Gomez [4]は非予混合噴霧流の群燃焼特性を実験的に調べた。一方、Nakabe ら[11]は灯油を燃料に用いた希薄予混合噴霧流の燃焼実験を行い、噴霧がクラスターに分かれて燃焼していることを示し、Akamatsu ら[3]はクラスターの群燃焼特性を示した。Mikami ら[12]はこれらの二つの間に位置する過濃予混合噴霧流についてその燃焼挙動を実験的に調べている。その研究では、図1に示される内部火炎と外部火炎から成る二重構造火炎が観察された。内部火炎は平均液滴径を減少させるか総当量比を増大させると消失することも示されたが、総当量比の影響については示されていない。Reveillon・Vervisch [13]は正ヘプタンを燃料とする予混合噴霧流の燃焼について数値計算を行い、総当量比および液滴数密度を変化させた場合の火炎構造変化について報告している。Nomura ら[15]は凝縮法により形成された予混合

* Corresponding author. E-mail: mmikami@yamaguchi-u.ac.jp

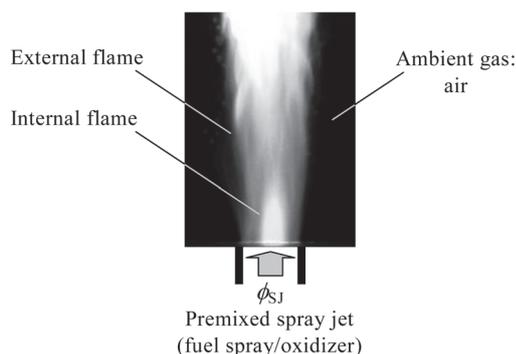


Fig.1 Typical photograph of burning premixed spray jet. The overall equivalence ratio ϕ_{SJ} of the premixed spray jet is 8.6 and the oxygen concentration of the carrier gas is 0.30. Adapted from Ref. 12.

メタノール噴霧中の火炎伝播について、総当量比も変化させて実験的に調べた。Greenberg・Sarig [6]は対向流における予混合噴霧の多重火炎構造を異なる総当量比について解析的に研究を行った。Nakamura ら[9]およびWatanabe ら[10]は低揮発性の正デカンを燃料に用いた場合について対向流における予混合噴霧燃焼の数値計算を行い、燃料分布の空間不均一性の存在する場での群燃焼挙動を示している。また、総当量比を過濃側で増大させると液滴群の冷却効果により火炎温度が低下することを報告している。

本研究では、燃料として低揮発性の正デカンを用い、燃料分布の空間不均一性を有する過濃予混合噴霧流の燃焼について実験的に調べた。特に予混合噴霧の総当量比を変えた場合の火炎構造変化について群燃焼の発生に到る過渡的過程に注目して議論を行った。

2. 実験装置および実験方法

本研究では文献 12 で用いた予混合噴霧バーナを用いて実験を行った。図 1 に示されるとおり、燃料噴霧と空気から成る総当量比 ϕ_{SJ} の予混合噴霧流が直径 16.4 mm のバーナポート出口から静止空气中に噴出され、燃焼される。液体燃料はバーナ出口から 20 mm 下方に設置された二流体噴射弁 (1/8 J type, Spraying Systems) により微粒化される。噴霧の平均液滴径は微粒化空気流量により調節した。予混合噴霧流中の空気流量を一定とするため、補助空気をバーナポート内に供給した。予混合噴霧流中の総空気流量はすべての条件で 5 L/min とした。文献 12 では予混合噴霧流中の燃料流量は変化させず搬送気体の酸素濃度を変化させることにより総当量比 ϕ_{SJ} を変化させたが、本研究では搬送気体は空気のみとし、燃料流量を変化させることで、予混合噴霧流の総当量比 ϕ_{SJ} を変化させた。燃料には低揮発性の燃料として正デカンを用いた。300 K における正デカン液滴表面の気相当量比は約 0.1 であり、希薄可燃限界よりも小さい。

非燃焼時にバーナポート出口 2 mm 上方において位相ドップラー粒子分析計 (PDPA) (2D-PDPA/RSA, TSI/Aerometrics) を用いて測定したザウタ平均液滴径 d_{32} を予混合噴霧の代表液滴径とした。PDPA 計測はサンプル液滴数が 10000 個に達するかまたは計測時間が 1 分に達した時点で終了とした。本実験の噴霧は後述のとおり多分散噴霧であり、PDPA により計測した液滴径範囲は 0.8-276 μm である。軸方向の液滴速度も同時に計測を行った。

燃焼挙動の直接撮影は撮影速度 30 fps のデジタルビデオカメラ (DCR-PC100, SONY) を用いて行った。OH ラジカルの自発光像は撮影速度 4500 fps の高速度ビデオカメラ (EKTAPRO Model4540, KODAK) にイメージインテンシファイア (C6653MOD, Hamamatsu Photonics) および光干渉フィルタ (peak wave length: 308 nm, half width: 14.4 nm) を装着して撮影を行った。

3. 実験結果および考察

3.1. 異なる予混合噴霧総当量比に対する群燃焼挙動

図 2 に異なる予混合噴霧総当量比 ϕ_{SJ} に対する代表的な火炎の写真を示す。火炎高さは時間的に変動するため、火炎高さが平均値を示す時期の火炎の写真を図 2 に示した。いずれの条件においても噴霧のザウタ平均液滴径は $d_{32} = 105 \mu\text{m}$ である。図 2 の総当量比が $\phi_{SJ} = 4.0, 8.0$ および 12 の場合について、非燃焼時の液滴径の頻度分布および液滴速度をそれぞれ図 3 および図 4 に示す。これより、本実験の噴霧は多分散噴霧であり、総当量比が異なっても液滴径分布および液滴速度と液滴径の関係は互いに似ていることがわかる。各総当量比に対する液滴の平均速度は $\phi_{SJ} = 3.0-14$ の範囲において $8.1 \pm 0.3 \text{ m/s}$ の範囲内であった。図 2 からわかるとおり、 $\phi_{SJ} = 4.0$ では火炎全体において青炎が観察された。黄色の輝炎領域は $\phi_{SJ} = 6.0$ において火炎上端部において見られた。総当量比を増加させると火炎全体の

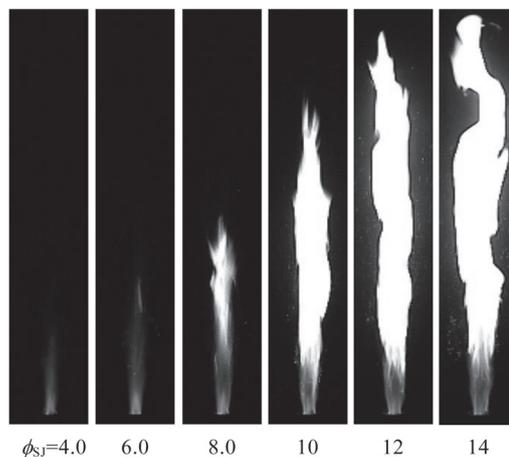


Fig.2 Typical photographs of burning premixed spray jets for different overall equivalence ratios ($d_{32} = 105 \mu\text{m}$).

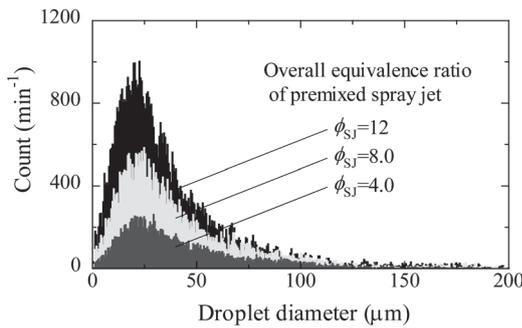


Fig.3 The droplet diameter distributions measured near the exit of the burner without combustion for different overall equivalence ratios of the premixed spray jet. Sauter-mean droplet diameter d_{32} was $105 \mu\text{m}$ for each condition.

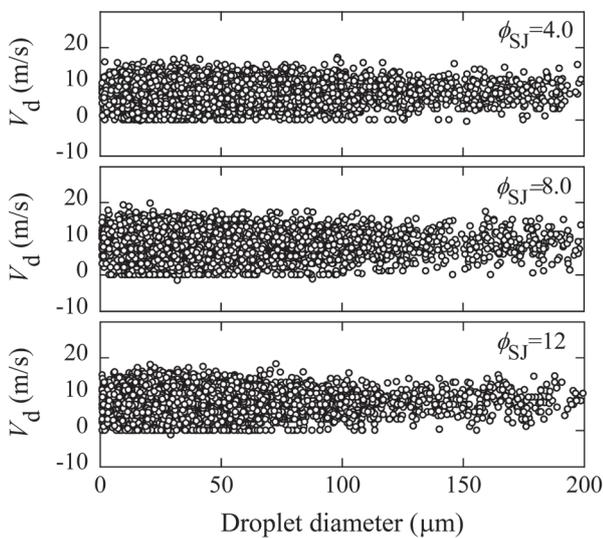


Fig.4 The droplet velocity vs. droplet diameter measured near the exit of the burner without combustion for different overall equivalence ratios ϕ_{SJ} of the premixed spray jet ($d_{32} = 105 \mu\text{m}$).

高さは増大し、輝炎領域が増大するとともに青炎領域は減少した。

火炎下部付近の写真を図 5 に示す。総当量比が $\phi_{SJ} = 12$ 以下の条件では、外周を取り囲む火炎の内部に別の火炎が存在しており、外部火炎と内部火炎からなる二重火炎構造が見られる。 $\phi_{SJ} = 14$ の場合には外部火炎のみが見られた。Mikami ら[12]は予混合噴霧流の搬送気体酸素濃度を低下させることにより総当量比を増大させ、内部火炎のある二重火炎構造から外部火炎のみの火炎構造への遷移を観察している。ただし、搬送気体の酸素濃度を変化させる場合には噴霧流の総当量比だけでなく希釈率も変化するため、両者の影響を区別するのが困難である。本実験では搬送気体の酸素濃度は一定であるため、図 5 に見られる火炎構造遷移は総当量比の変化に伴うものであるといえる。

図 6 に外部火炎高さおよび内部火炎高さの総当量比依存性を示す。外部火炎については 30 fps のビデオカメラによ

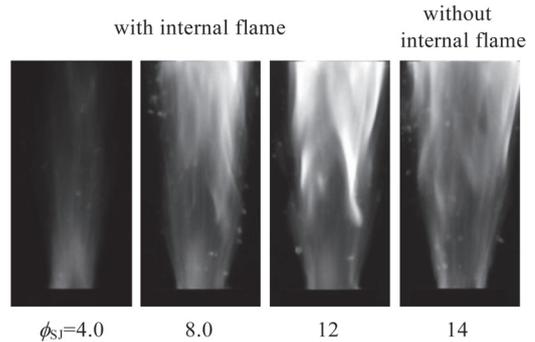


Fig.5 Typical photographs of the lower part of the burning premixed spray jets for different overall equivalence ratios ϕ_{SJ} ($d_{32} = 105 \mu\text{m}$).

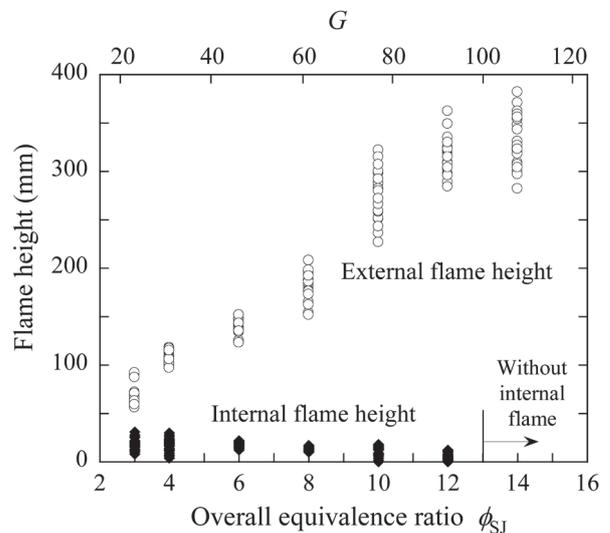


Fig.6 Dependences of flame heights on overall equivalence ratio ϕ_{SJ} of the premixed spray jet ($d_{32} = 105 \mu\text{m}$). The external flame height for 20 consecutive frames of 30 fps digital video and the internal flame height for 30 consecutive frames of 4500 fps high-speed video are plotted for each overall equivalence ratio.

り撮影した連続する 20 フレーム分の火炎高さを、また、内部火炎については 4500 fps の高速度ビデオカメラにより撮影した連続する 30 フレーム分の火炎高さをプロットしている。このグラフから、総当量比を低下させていくと外部火炎高さは減少するが内部火炎高さは増大し、両者は近づいていくことがわかる。

図 6 には各総当量比に対応する群燃焼数も示した。Chiu・Liu [1]は球形の液滴群の燃焼モードを分類する群燃焼数 G を提案し、解析的に各モードの燃焼特性を調べた。液滴蒸発に与える対流の影響を無視すると、群燃焼数 G は

$$G = 2\pi n d R_C^2 \quad (1)$$

と表わされる[4]。ここで n 、 d および R_C はそれぞれ、液滴数密度、液滴直径および液滴群半径である。Chen・Gomez [4]はこの式の R_C の代わりに火炎半径を用いることにより

非予混合噴霧流の群燃焼特性を実験的に調べている。ここでは、この方法に倣って予混合噴霧流の群燃焼数 G を求める。ここで噴霧を各液滴を中心とする直径 S のセルの集合と考えると、群燃焼数は

$$G = 3(2R_C / d)^2 (S / d)^3 \quad (2)$$

と表わされる。ここで、非蒸発噴霧を仮定し、セル内の気相を空気として考えると、群燃焼数は総当量比 ϕ_{SJ} と以下のとおり関係づけることができる。

$$G = 3\phi_{SJ} \left(\frac{2R_C}{d} \right)^2 \left(\frac{\rho_A}{\rho_F} \right) \left(\frac{v_F W_F}{v_{O_2} W_{O_2} / Y_{O_2}} \right) \quad (3)$$

ただし、 ρ_F , ρ_A , v_F , v_{O_2} , W_F , W_{O_2} および Y_{O_2} はそれぞれ、液体燃料密度、空気密度、燃料量論係数、酸素量論係数、燃料分子量、酸素分子量および空気中の酸素質量分率である。本研究では、液滴群直径 $2R_C$ をバーナポート直径により近似し、また、液滴直径 d としてはザウタ平均液滴径 d_{32} を用いた。図 6 では総当量比 ϕ_{SJ} を 3 から 14 まで増加させると群燃焼数 G はおよそ 20 から 110 まで増大している。この G の範囲は Chiu・Liu [1] の分類では外部群燃焼から外殻燃焼に相当する。ただし、群燃焼理論は定常状態を仮定した解析に基づくものであるため、有限の特性時間に起因する非定常性や群燃焼の発生に到る過渡的過程は考慮されておらず適切ではない点がある。

燃料液滴の蒸発はある有限時間内で終了するため、各液滴の影響が及ぶ範囲もまた有限である[17]。式(2)からわかるとおり群燃焼数 G には、液滴直径 d に対する相対的な空間スケールとして平均的な液滴中心間距離である S と液滴群半径 R_C が含まれている。液滴の影響が距離 S ほど離れた液滴に及ぶことで液滴間干渉が生じるが、その影響が液滴群中心にまで及ぶかどうかは液滴蒸発時間と拡散または熱伝導時間との関係で決まる。また、蒸発により供給された燃料蒸気は群火炎内に蓄積され、火炎径も時間とともに変化すると考えられる。噴霧流燃焼の場合には、上流で供給され消費されない燃料蒸気は下流に蓄積して燃焼する。予混合噴霧流の燃焼の場合、内部火炎が存在しない場合には外部火炎のみが熱供給源であり、噴霧中心部では蒸発が活発ではない[12]。ただし、内部火炎が存在する場合には、内部火炎が下流の場に対する熱の供給源となるため、内部火炎背後では蒸発が活発となる[12]。以上のとおり、予混合噴霧流の群燃焼挙動は上流で発生する内部火炎に依存して変化すると考えられる。後述のとおり内部火炎の発生は主に液滴間隔程度の影響伝達により決まっていることが考えられる。次節では内部火炎について議論を行う。

3.2. 内部火炎特性

異なる総当量比 ϕ_{SJ} に対する内部火炎高さの時間変化を図 7 に示す。 $\phi_{SJ} = 8.0$ の場合、内部火炎高さの変動は比較的小さい。図 8 に $\phi_{SJ} = 8.0$ の場合の OH 自発光像の連続写

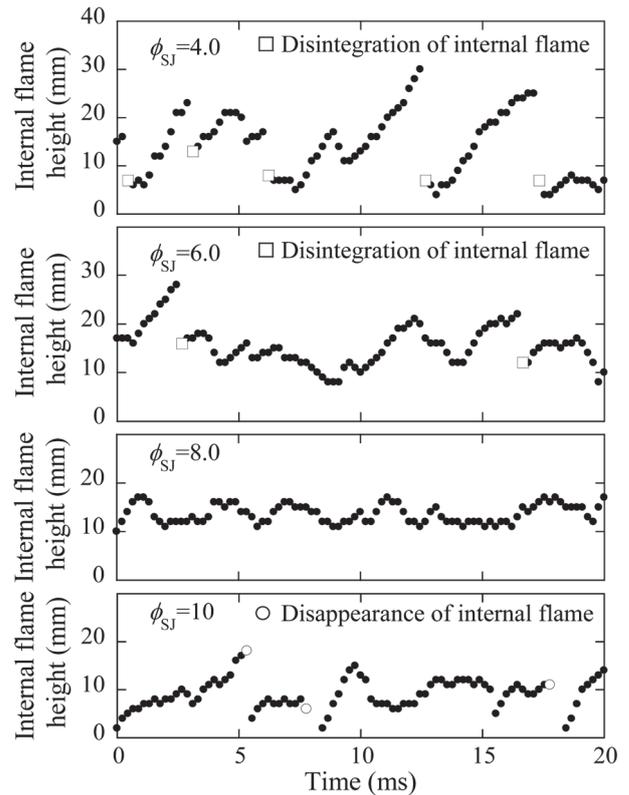


Fig.7 Temporal variations of the height of the internal flame for different overall equivalence ratios ϕ_{SJ} ($d_{32} = 105 \mu\text{m}$).

真を示す。外部火炎内に内部火炎が形成されており、微小に変動していることがわかる。図 7 からわかるように、総当量比を減少させると平均的な内部火炎高さが増大するとともに、内部火炎高さの変動も大きくなる。総当量比が $\phi_{SJ} = 6.0$ より小さい場合には内部火炎が分裂するのが観察された。図 9 に $\phi_{SJ} = 4.0$ の場合の OH 自発光像の連続写真を示す。図 8 の $\phi_{SJ} = 8.0$ の場合よりも高さの低い外部火炎内に長く伸びた内部火炎が存在しており、内部火炎の先端が分裂する様子が見られる。分裂した内部火炎は下流に行くにしたがい外部火炎内で消滅した。図 8 および図 9 から、内部火炎は $\phi_{SJ} = 8.0$ の場合より $\phi_{SJ} = 4.0$ の場合の方が凹凸が大きいがわかる。総当量比が $\phi_{SJ} = 10$ より大きい場合には内部火炎が瞬間的に消滅するのが観察された(図 7)。

この内部火炎の特性を液滴列の燃え広がり火炎の特性に基づいて考察を行う。まず初めに、内部火炎の時間平均特性について議論を行う。予混合噴霧流中に形成される内部火炎と静止予混合噴霧中における燃え広がり火炎の相似性を考慮すると、内部火炎高さは噴霧流速と燃え広がり速度により決まると考えられる。図 6 および図 7 において、内部火炎高さは総当量比の増加に伴い減少したが、図 4 から噴霧の平均速度は総当量比に依存していないため、燃え広がり速度が総当量比の増加に伴い増大したと考えられる。噴霧における燃え広がりが火炎前縁近傍における熱的情報伝達により決まると考えると、燃え広がり速度の特性

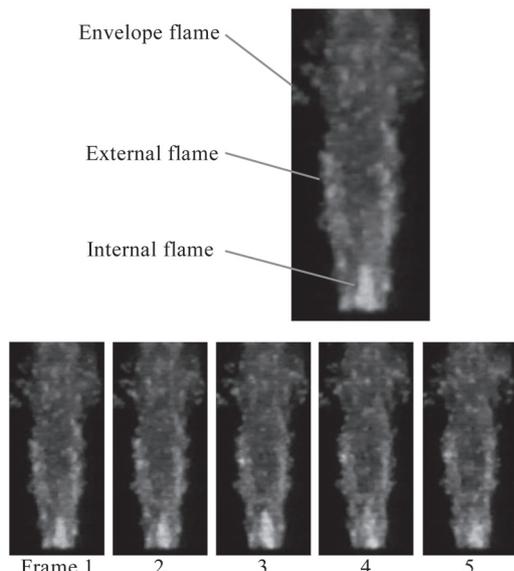


Fig.8 Intensified high-speed images of OH radical emission from burning premixed spray for overall equivalence ratios $\phi_{SJ} = 8$. The image interval is 1/4500 s.

は液滴列の燃え広がり特性を通して理解できるといえる。液滴列の燃え広がりにおいては、無次元液滴間隔が $S/d > 4$ の範囲における正規化された燃え広がり速度 V_{fd} は S/d が小さいほど大きい[18]。ここで、式(3)の群燃焼数導出の際と同様に、予混合噴霧を直径 d の液滴を中心とし空気で満たされた直径 S のセルの集合体と考えた場合の S/d を予混合噴霧の平均液滴間隔と考えると、本実験における総当量比 $\phi_{SJ} = 3-12$ に対応する平均液滴間隔はおおよそ $S/d = 15-9$ である。これより、内部火炎高さの総当量比依存性を定性的に説明可能である。

Mikami ら[18]の正デカン液滴列の燃え広がり速度 V_{fd} から、本実験の予混合噴霧の $\phi_{SJ} = 12$ に対応する $S/d = 9$ の直径 $d = 105 \mu\text{m}$ の液滴列の燃え広がり速度 V_f を求めると、300 K では 0.24 m/s、600 K では 0.67 m/s 程度となる。ただしこれらの値は噴霧の平均速度の 8 m/s より 1 桁以上も小さい値である。本実験における予混合噴霧は多分散噴霧であり、図3に示されるとおり $25 \mu\text{m}$ 付近に液滴径頻度の最大値が存在する。よって、実際の燃え広がり速度を決める代表液滴径はザウタ平均径 d_{32} より小さい可能性があり、その場合は燃え広がり速度はより大きく見積もられる。

次に、図9に示される内部火炎の分裂について考察を行う。内部火炎の振動および分裂は液滴の空間分布の不均一性に起因する局所燃え広がり速度の不均一性によるものと考えられる。燃え広がり速度は基本的に、液滴間隔が小さいほど、また、液滴径が小さいほど大きい[18]。よって、内部火炎は液滴径が小さく数密度の高い領域へと近づく傾向にある。これにより、その領域において内部火炎の幅が小さくなり、最終的に分裂が生じると考えられる。このように考えると、分裂した内部火炎内は液滴の数密度が小さ

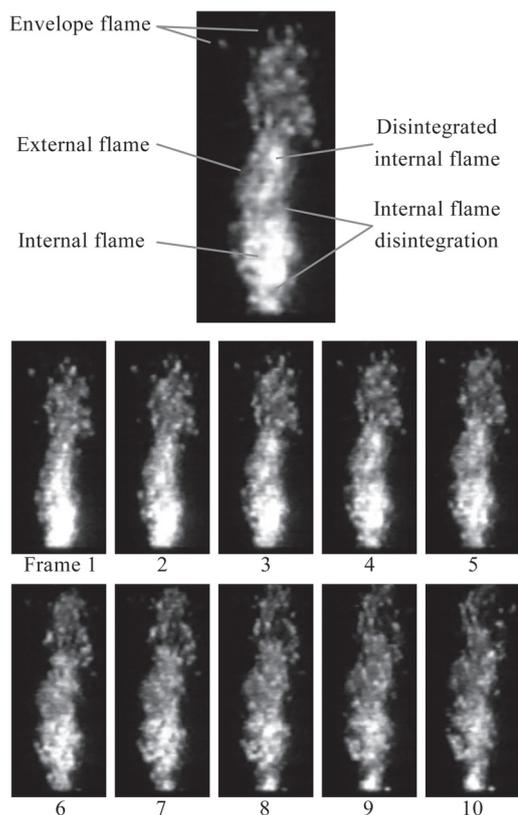


Fig.9 Intensified high-speed images of OH radical emission from burning premixed spray for overall equivalence ratios $\phi_{SJ} = 4$. The image interval is 1/4500 s.

く酸素濃度の高い領域であり、その周囲には燃料過濃な領域が存在しているといえる。このような内部火炎の分裂と類似した現象は、Reveillon・Vervisch [13]の過濃ヘプタン予混合噴霧流燃焼の数値計算においても見られている。図10に、異なる総当量比に対する燃焼状態を他の平均液滴径についての結果も合わせて示す。これより、内部火炎の分裂が生じる総当量比の上限の平均液滴径への依存性が小さいことがわかる。

3.3. 内部火炎を伴わない群燃焼への遷移

総当量比を増加させた場合に見られる内部火炎を伴う群燃焼から内部火炎を伴わない群燃焼への遷移について考察を行う。図10に示されるとおり、この遷移の生じる総当量比は平均液滴径に依存している。Mikami ら[12]は予混合噴霧流の搬送気体酸素濃度を変化させることにより総当量比を変化させたが、その際にも同様の傾向が見られている。ここでは、3.2節と同様に低揮発性燃料の液滴列の燃え広がり機構に基づいて内部火炎特性について考える。

正デカンは揮発性が低く、300 K では液滴表面の気相当量比は約 0.1 と希薄可燃限界よりも小さい。そのため、未燃液滴への燃え広がりにおいては、火炎から未燃液滴への加熱、液滴まわりでの可燃性混合気層の形成、可燃性混合気層内の着火および火炎伝播、新たな拡散火炎の形成、が

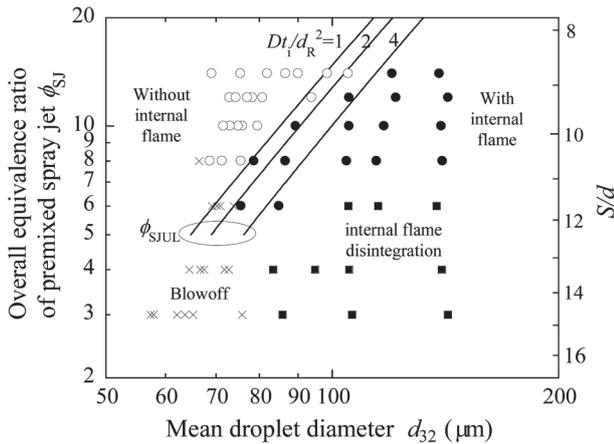


Fig.10 Combustion mode of the premixed spray jet and overall equivalence ratio at the upper limit of the group combustion with internal flame ϕ_{SJUL} . The open symbol shows combustion without internal flame and the closed symbols show combustion with internal flame. The closed square shows the case with internal flame disintegration.

繰り返される[18]. 液滴列の場合と異なり, 予混合噴霧の場合, 燃料蒸気は各液滴の占有空間内に蓄積される. そのため, 予混合噴霧の総当量比が十分大きい場合には, 液滴まわりに形成された混合気層内で着火が生じ火炎伝播が完了して新たな拡散火炎が形成されるより以前に, 液滴間の混合気濃度が過濃可燃限界を超える可能性がある.

ここで, 3.1 節において群燃焼数を求めた際と同様の単分散予混合噴霧を考える. t_i を各液滴の占有空間内に当量比 1 の領域が存在する場合の化学的着火遅れ時間, t_p を混合気層内の予混合火炎伝播時間, t_d を過濃可燃限界濃度位置が液滴表面から液滴の占有空間境界まで拡散により達する時間とすると, 上記の議論から, 内部火炎の存在する上限の総当量比 ϕ_{SJUL} 付近では t_i と t_p の和がおよそ t_d と等しいと考えられ,

$$t_i + t_p = t_d \quad (4)$$

である. ここで t_d として液滴表面から占有空間境界までの距離を用いた拡散時間

$$t_d = \frac{\{(S/d)_{UL} - 1\}^2 d^2}{4D_g} \quad (5)$$

を用いる. ここで D_g は拡散係数である. 添字の UL は内部火炎の存在する上限の総当量比 ϕ_{SJUL} と対応するものであることを示している. t_p としては, 半径 $S/2$ の占有空間境界を速度 V_p で火炎伝播するのに要する時間

$$t_p = \frac{\pi(S/d)_{UL} d}{2V_p} \quad (6)$$

を用いる. 以上より, 内部火炎の存在する上限の総当量比

ϕ_{SJUL} は以下のように表わされる.

$$(S/d)_{UL} = \left\{ \frac{4D_g t_i}{d^2} - 1 + \left(\frac{\pi D_g}{V_p d} + 1 \right)^2 \right\}^{1/2} + \frac{\pi D_g}{V_p d} + 1 \quad (7)$$

$$\phi_{SJUL} = \left(\frac{\rho_F}{\rho_A} \right) \left(\frac{v_{O_2} W_{O_2} / Y_{O_2}}{v_F W_F} \right) (S/d)_{UL}^{-3} \quad (8)$$

ここで, t_i は液滴直径に依らない値と仮定する. Tanabe ら[19]は燃料液滴の着火実験を行い, 液滴加熱などの物理過程が支配的な冷炎発生までの遅れ時間は初期液滴径とともに増大するが, 化学反応が支配的な冷炎発生から熱炎発生までの期間はほとんど初期液滴径に依存しないことを示した. Moriue ら[20]の定容セル内の液滴着火の数値計算においても不均一場での着火が生じる場合には同様の結果が報告されている. 図 10 に式 (7)-(8) による ϕ_{SJUL} と液滴径 d の関係を示す. 図中の d_R は液滴径の参照値であり $d_R = 100 \mu\text{m}$ とし, $D_g/(V_p d_R) = 1$ とした. 図 10 に示されるとおり, ϕ_{SJUL} は液滴径が大きいくほど大きく, 実験結果と定性的に一致している. Mikami ら[12]は過濃予混合噴霧内の酸素濃度を低下させた場合に内部火炎の消滅を観察している. 酸素濃度を低下させることで, セル境界が過濃可燃限界に達するまでの時間 t_d は減少し, 逆に着火遅れ時間 t_i および火炎伝播時間 t_p は増大するため, 内部火炎が消滅する群燃焼遷移が生じたと理解できる. ここでは単分散噴霧を考えたが, 実際の噴霧は多分散噴霧であり, また液滴間隔も等間隔ではない. 多分散噴霧の特性を表す代表液滴径については今後の課題である.

4. 結言

低揮発性の正デカンを燃料として用いた場合の過濃予混合噴霧流の燃焼について実験的に研究を行った. 予混合噴霧流内の空気流量は一定とし燃料流量を変化させ予混合噴霧総当量比を変化させた. 得られた結論は以下のとおりである.

1. ザウタ平均液滴径一定のもとでは, ある総当量比以上では外部火炎のみを伴う群燃焼が見られ, それ以下では内部火炎を伴う二重火炎構造の群燃焼が見られる. 内部火炎高さは総当量比を低下させると増大し, ある程度以上低下させると, 内部火炎の一部が分裂し外部火炎内で消滅する燃焼挙動を示す.
2. 内部火炎の特性は予混合噴霧中の燃え広がり火炎の特性を通して理解できる. 液滴の空間不均一性による局所燃え広がり速度の不均一性により内部火炎分裂が生じると考えられる.
3. 未燃液滴まわりの混合気層内で着火・火炎伝播が生じる前に, 各液滴の占有空間が過濃可燃限界を超えることで, 内部火炎が消滅すると考えられる.

謝辞

本研究の一部は(財)日本宇宙フォーラムが推進している宇宙環境利用に関する公募地上研究プロジェクトの一環として行われた。また、本研究を行うにあたり本学大学院生の水田好実君および仲地脩烈君の協力を得たことに謝意を表す。

References

1. Chiu, H. H., Liu, T. M., *Combustion Sci. Tech.*, 17: 127-142 (1971).
2. Labowski, M., Rosener, D. E., in *Evaporation - Combustion of Fuels* (J. T. Zung, ed.), American Chemical Society, 63-79 (1978).
3. Akamatsu, F., Mizutani, Y., Katsuki, M., Tsushima, S. and Cho, Y. D., *Proc. Combust. Inst.*, 26: 1723-1730 (1996).
4. Chen, G. and Gomez, A., *Combust. Flame*, 110 (3): 392-404 (1997).
5. Continillo, G. and Sirignano, W. A., *Combust. Flame*, 81: 325-340 (1990).
6. Greenberg, J. B. and Sarig, N., *Combust. Flame*, 104 (4): 431-459 (1996).
7. Li, S. C., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 23: 303-347 (1997).
8. Gutheil, E., *Combust. Theory Model.*, 5: 131-145 (2001).
9. Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R., Katsuki, M., *Physics of Fluids* 17: 123301 (2005).
10. Watanabe, H., Kurose, R., Hwang, S. M., Akamatsu, F., *Combust. Flame*, 148: 234-248 (2007).
11. Nakabe, K., Mizutani, Y., Hirano, T. and Tanimura, S., *Combust. Flame*, 74 (1): 39-51 (1988).
12. Mikami, M., Yamamoto, K., Kojima, N., *Proc. Combust. Inst.*, 30: 2021-2028 (2005).
13. Reveillon, J., Vervisch, L., *J. Fluid Mech.*, 537: 317-347 (2005).
14. Aggarwal, S. K. and Sirignano, W. A., *Combust. Flame*, 62, 69-84 (1985).
15. Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, H., Ujiie, Y., Sato, J., Kono, M. and Yoda, S., *Proc. Combust. Inst.*, 28: 999-1005 (2000).
16. Nunome, Y., Kato, Y., Maruta, K., Kobayashi, H. and Niioka, T., *Proc. Combust. Inst.*, 29: 2621-2626 (2003).
17. Mikami, M., Kono, M., Sato, J. and Dietrich, D. L., *Proc. Combust. Inst.*, 27: 2643-2649 (1998).
18. Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Wakashima, Y., Kikuchi, M. and Yoda, S., *Combust. Flame*, 146 (3): 391-406 (2006).
19. Tanabe, M., Bolik, T., Eigenbrod, C., Rath, H. J., Sato, J., Kono, M., *Proc. Combust. Inst.*, 26: 1637-1643 (1996).
20. Moriue, O., Mikami, M., Kojima, N. and Eigenbrod, C., *Proc. Combust. Inst.*, 30: 1973-1980 (2005).